

ISS-IMAP 搭載に向けた EUV 多層膜反射鏡の開発

酒井恒一¹、村上豪²、吉岡和夫²、小川源太郎²、
本間達朗¹、吉川一朗²

¹ 東京大学理学部地球惑星物理学科 ² 東京大学地球惑星科学専攻

概要

我々は国際宇宙ステーション(ISS:International Space Station)から超高層大気の撮像観測を行う IMAP mission(Ionosphere, Mesosphere, upper Atmosphere, and Plasmasphere mapping)において、プラズマ圏の極端紫外光撮像観測装置 EUVI(Extreme UltraViolet Imager)を開発している。EUVIは1枚の反射鏡、バンドパスフィルタと2次元検出器で構成される直焦点反射型望遠鏡である。極端紫外光(EUV)は物質表面での反射率が極めて低いことから、光学系には高い反射率を達成できる多層膜反射鏡を用いる。いままでの機器はMo/Siを積層した多層膜を主に採用していたが、EUVIをさらに小型化し、かつ高い精度を得るため、我々は Y_2O_3/Al 多層膜反射鏡を新らしく開発した。本論文は Y_2O_3/Al 多層膜反射鏡について行った反射率試験、大気中での劣化試験の結果を紹介する。

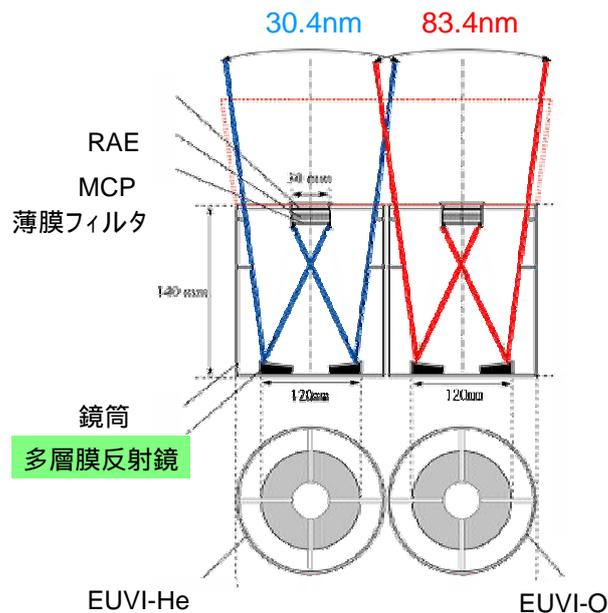


図1：極端紫外光撮像装置、EUVIの概略図。ヘリウムイオンと酸素イオンをそれぞれ撮像する2台の観測装置から構成される。1台の装置は1枚の直入射反射鏡、バンドパスフィルタ、そして検出器からなる直焦点反射型光学系である。

EUVI

EUVI は ISS の飛行する地上高度 500 km から軌道後方のリム方向を指向し、極端紫外光によってプラズマ圏中のヘリウムイオンと酸素イオンを撮像観測する(図 1)。電離圏上層からプラズマ圏におけるプラズマの鉛直分布を観測することによって、プラズマ輸送の経度、緯度、地方時、季節依存性を調べる。プラズマ圏中の電子密度は 10 個/cc から 1000 個/cc である。プラズマ圏は光学的に薄いため、観測する光量は視線方向に積分されたコラム密度に比例する。ヘリウムイオンはプラズマ圏中のイオンのうち 5 から 20% を構成すると言われ水素イオンについて主要なイオンである。酸素イオンの構成比は数% と報告されている一方でサブストームの主相から回復相にかけてプラズマ圏中の構成比が卓越することも報告されており、観測は重要である。

EUVI はそれぞれヘリウムイオンと酸素イオンが太陽光を共鳴散乱した 30.4nm と 83.4nm の波長の光を撮像する 2 台の観測装置(EUVI-He、EUVI-O)で構成される。図 2 はその概略図である。1 台の装置は 1 枚の直入射反射鏡、バンドパスフィルタ、そして検出器からなる直焦点反射型光学系で、 $15^{\circ} \times 15^{\circ}$ の視野角を持ち角度分解能は 0.1° である。バンドパスフィルタには Al/C、In の薄膜フィルタを用いて、それぞれ 30.4nm と 83.4nm の波長の光を選択する。検出器にはレジスティブアノード付き 5 段 MCP を使用する。装置全体の大きさは 280 mm \times 260 mm \times 300 mm、質量は 3.0 kg (但しマージンを含む)、消費電力は 22 W である。

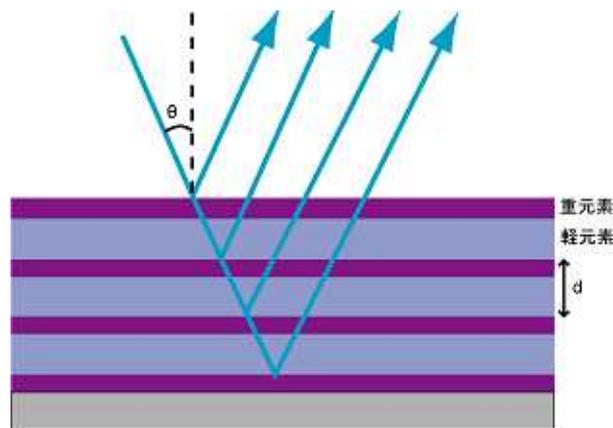


図 2：多層膜反射鏡の原理を示す。重元素と軽元素を交互に重ねた層の境界の反射光が干渉し高い反射率を達成できる。その反射率は多層膜の物質、層厚、入射角に依存する。

極端紫外光撮像観測のための多層膜反射鏡

EUV は高いエネルギーを持つため物質表面で吸収されてしまい反射率が極めて低い。そのためプラズマ圏のような光量の小さい対象は撮像観測が不可能だった。EUV 領域に高い反射率を持つ多層膜反射鏡の開発によって、プラズマ圏の撮像観測が初めて可能となった。

多層膜反射鏡は軽元素と重元素を交互に重ね、層の境界からの反射光が干渉し強めあうことによって高い反射率を達成できる。図 3 に多層膜反射鏡の原理を示す。その反射率は多層膜物質の物性、層厚で決定され、干渉を利用するため入射角にも依存する。

のぞみ衛星はプラズマ圏中のヘリウムイオンが発する 30.4nm の波長の共鳴散乱光を撮像観測した[1]。XUV は 30.4nm に反射率の極大を持つように設計された Mo/Si 多層膜反射鏡を採用した。Mo/Si は図 4 に示されるように、EUV に高い反射率を持ち劣化が少ないことから今まで EUV の観測にはよく用いられてきた。さらに、かぐや衛星に搭載された UPI 観測機(Upper Atmosphere and Plasma Imager)の望遠鏡である TEX(Telescope of Extreme Ultraviolet)は月周回軌道から地球プラズマ圏を撮像観測し、同じ Mo/Si 多層膜反射鏡を採用した[2]。

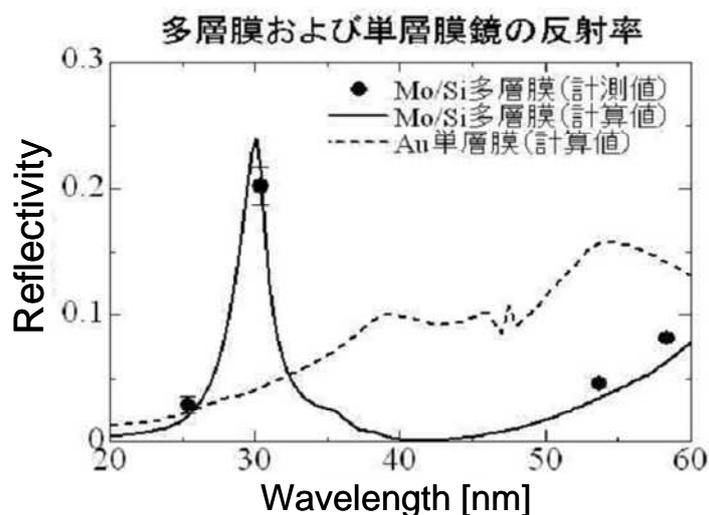


図 3 : Mo/Si 多層膜の波長ごとの反射率を示す。30.4nm で 20%程度の高い反射率を達成するが、混入光となる 53.9nm、58.4nm でも数%の反射率がある。

EUVI によるプラズマ圏撮像観測における問題点

図 5 は IMAGE 衛星に搭載された EUV 観測器によるプラズマ圏の観測である。プラズマ圏中のヘリウムイオンが共鳴散乱する光以外に EUV で見えるオーロラオーバル(EUV Aurora)や電離圏の発光(Airglow)が観測されている。EUV Aurora は酸素イオンの禁制遷移発光である 53.9 nm の混入光であり、Airglow はジオコロナ中の中性ヘリウム粒子による 58.4nm の発光と電離圏中の酸素イオンの発光による混入光であると考えられている。図 4 では、Mo/Si 多層膜には目的とする 30.4 nm だけでなく 53.9 nm と 58.4 nm の波長にもいくらかの反射率があることが確認できる。さらに ISS-IMAP は高度 500 km で観測するので電離圏の発光による混入光は大きいと予想される。

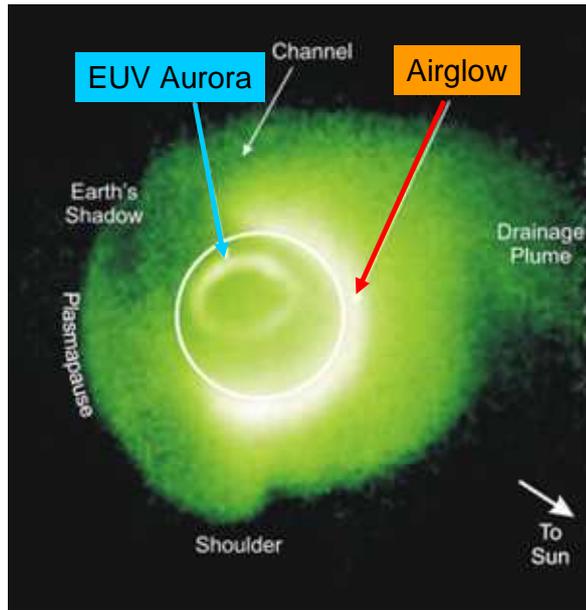


図 4: IMAGE/EUV によって観測されたプラズマ圏の画像データを示す。電離圏の発光 (Airglow) やオーロラ発光 (EUV Aurora) が観測されるのは混入光によると考えられている。

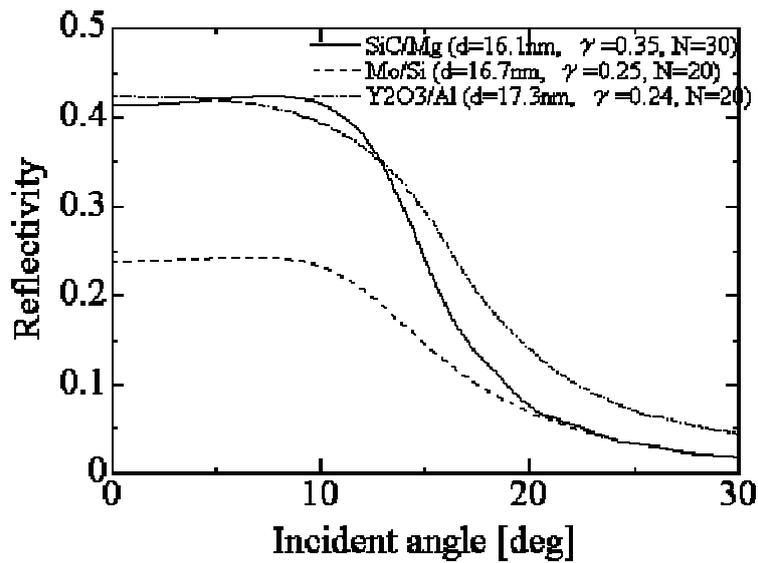


図 5 : Mg/SiC、Mo/Si、Y₂O₃/Al の入射角ごとの反射率を示す。反射率は物性値からの計算値である。Mg/SiC と Y₂O₃/Al が Mo/Si よりも高い反射率を達成している。

多層膜物質の検討

光量の小さいプラズマ圏の発光を観測するときには混入光はできる限り取り除かなければならない。一方で現在の技術ではバンドパスフィルタによる減光には限界がある。そこで主鏡での反射において目標とする波長 30.4nm の反射率は高く保ちつつ、他の波長の反射率を低く抑える設計が必要となる。多層膜鏡の反射率は多層膜物質の物性と層厚に依存する。多層膜物質を検討した結果として図 6 に Mo/Si、Mg/SiC、Y₂O₃/Al の入射角に対する反射率の比較を示す。以上の多層膜物質は EUV に高い反射率を持つと期待されている。多層膜反射鏡は干渉を利用して反射率を高めるので入射角が大きいことは波長が長い領域を表す。図では Mg/SiC と Y₂O₃/Al が Mo/Si より高い反射率を達成でき、かつ入射角の大きい側すなわち長波長側では反射率が低い。Mg/SiC は大気中で劣化し、反射率が変化することが知られている[3]。図 7 は大気中と真空中で保存した場合の Mg/SiC 多層膜の反射率の変化を示している。反射率の変化の要因には大気中での層の拡散などが考えられているが完全には理解されていない。以上の理由により Y₂O₃/Al が主鏡の多層膜物質として最適であると考えられる。

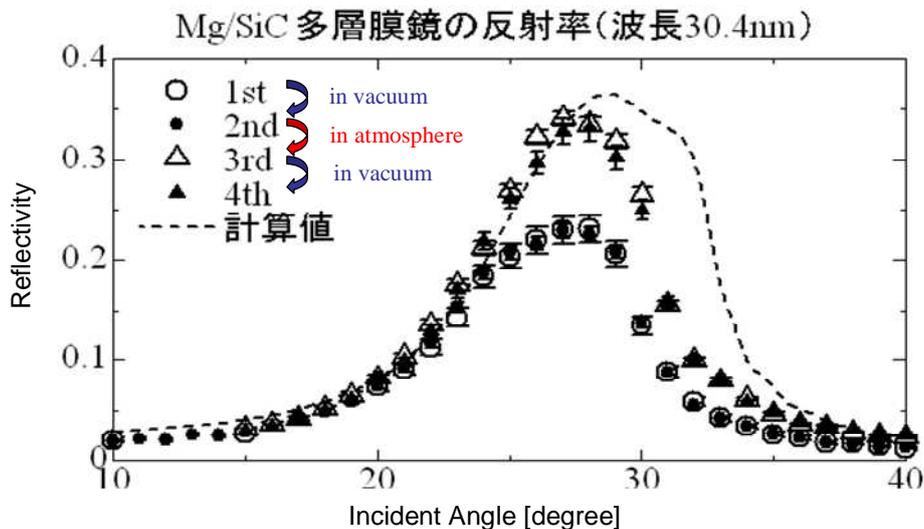


図 6: Mg/SiC 多層膜の 30.4 nm における入射角に対する反射率を示す。2 回目と 3 回目の測定の間は大気中に保存していたところ反射率が変化した。

Y₂O₃/Al 多層膜反射鏡の性能

Y₂O₃/Al 多層膜反射鏡の試作品を作成し反射率測定を行った。測定結果を図 8 に示す。入射角 10° において 30.4 nm の反射率はピークの 27% を達成した。この高い反射率により、EUVI では十分に S/N 比を確保できる。この結果により将来の EUV による惑星大気撮像の観測機はより小型化できるだろう。また 58.4 nm での反射率は 1.5% であり、その比は 18:1 である。観測機の光学系全体の感度を計算したのが図 9 である。感度でおよそ 1/1000

であり、混入光は小さくなることが確認できる。

また Y_2O_3/Al 多層膜の大気中における劣化を試験した。図 10 は真空中、窒素パーズ中、大気中で保存した場合の入射角 22° における 30.4 nm の反射率の変化を示した。ほぼすべての期間で反射率が変化していないことから、 Y_2O_3/Al 多層膜は大気中で安定であることがわかる。

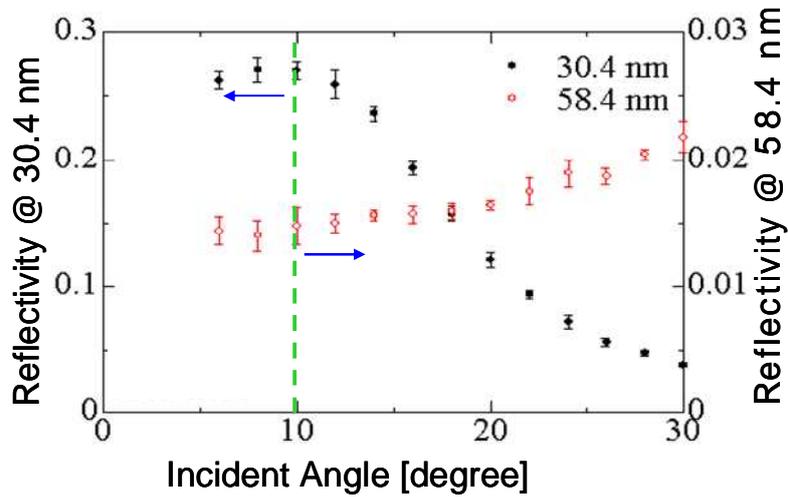


図 7 : Y_2O_3/Al 多層膜の入射角に対する反射率の測定結果を示す。

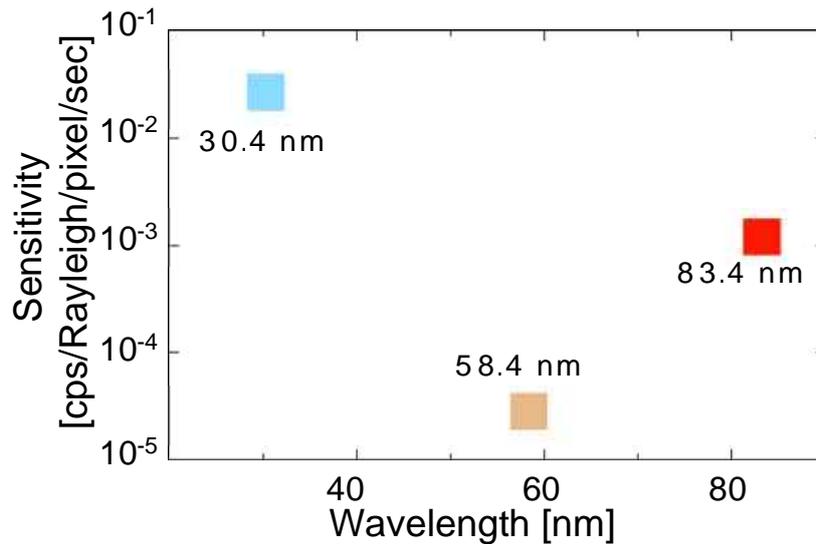


図 8 : Y_2O_3/Al 多層膜反射鏡を主鏡として用いた場合の EUVI の波長に対する感度を計算した。58.4 nm の波長に対する感度は 30.4 nm に比べて 1/1000 程度である。

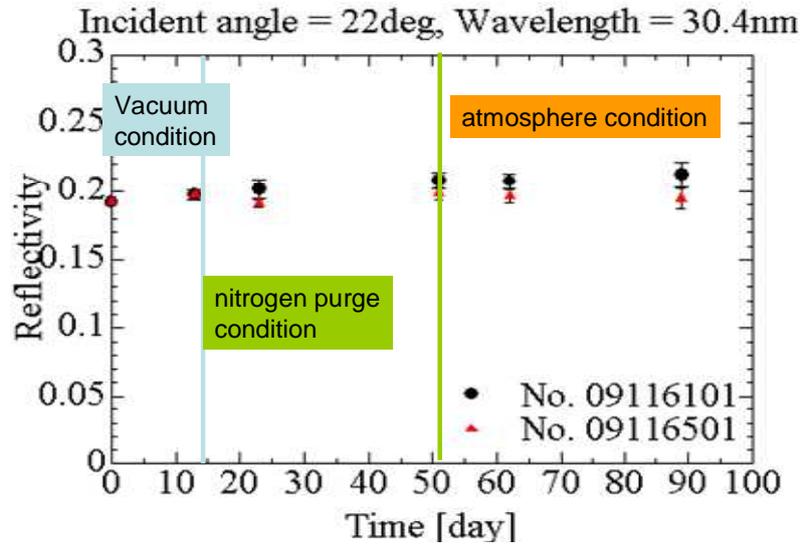


図 9 : Y_2O_3/Al 多層膜の真空中、窒素パージ中、大気中で保存したときの反射率の変化を示した。入射角は 22° 、波長は 30.4 nm である。ほぼ変化が見られないことから Y_2O_3/Al 多層膜の反射率は大気中でも安定していることがわかる。

まとめ

我々は ISS-IMAP 搭載にむけて極端紫外光撮像観測装置 EUVI を開発中である。本研究は主鏡の多層膜物質を検討し、 Y_2O_3/Al 多層膜が最適だという結果を得た。そして Y_2O_3/Al 多層膜のサンプルミラーを開発し反射率を測定した。 Y_2O_3/Al 多層膜は 30.4 nm に対して 27% と高い反射率を達成し、一方で混入光となる 58.4 nm では反射率 1.5% と小さいことを確認した。また大気中で保存した場合でも反射率は安定している。この結果は EUVI の要求する性能を十分に満たす。現在、我々はフライト品の主鏡を製作中である。

Reference

- [1] Nakamura, M., I. Yoshikawa, A. Yamazaki, K. Shiomi, Y. Takizawa, M. Hirahara, K. Yamashita, Y. Saito, and W. Miyake, Terrestrial plasmaspheric imaging by an extreme ultraviolet scanner on Planet-B, Geophys. Res. Lett., 27(2000), pp.141.
- [2] Yoshikawa, I., A. Yamazaki, G. Murakami, K. Yoshioka, S. Kameda, F. Ezawa, T. Toyota, W. Miyake, M. Taguchi, M. Kikuchi, and M. Nakamura, Telescope of extreme ultraviolet (TEX) onboard SELENE: science from the Moon, Earth Planets Space, 60(2008), pp.407–416.
- [3] Murakami, G., K. Yoshioka, A. Yamazaki, I. Yoshikawa, Y. Kasaba, Development of Mg/SiC multilayer mirrors for the IMAP small satellite, JAXA RR, 06(2007), 019